

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Mihaela Grbić**

**MORFOZA KRILA ZRAKOPLOVA**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2017.**

Zagreb, 24. travnja 2017.

Zavod: **Zavod za zračni promet**  
Predmet: **Osnove tehnike zračnog prometa**

## **ZAVRŠNI ZADATAK br. 4092**

Pristupnik: **Mihaela Grbić (0135237487)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Morfoza krila zrakoplova**

### **Opis zadatka:**

Dati pregled uvodnih postavki, definirati predmet istraživanja, svrhu i cilj istraživanja te ukratko prikazati kompoziciju rada.

Dati povijesni pregled razvoja morfoze krila zrakoplova.

Definirati ulogu i koristi od morfoze krila. Dati primjere do sad napravljenih koncepcija zrakoplova koji koriste tu tehnologiju. Naglasak staviti na usporednu analizu s zrakoplovima konvencionalnog dizajna krila.

Dati pregled projekata koji su se bavili morfozom krila zrakoplova i prikaz njihovih rezultata. Također, dati pregled budućih istraživanja na ovu tematiku.

Izvesti zaključna razmatranja o glavnim značajkama morfoze krila zrakoplova.

Zadatak uručen pristupniku: 28. travnja 2017.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

*Andrija Vidović*

izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

**ZAVRŠNI RAD**  
**MORFOZA KRILA ZRAKOPLOVA**  
**AIRCRAFT WING MORPHING**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović      Student: Mihaela Grbić  
JMBAG: 0135237487

Zagreb, rujan 2017.

# SAŽETAK

Krilo je najvažniji dio i noseća površina zrakoplova koje utječe na aerodinamičke performanse zrakoplova. Kako bi se postigle što bolje performanse zrakoplova potrebno je posebnu pozornost posvetiti razvoju novih tehnoloških rješenja konstrukcije krila zrakoplova. Morfoza krila zrakoplova predstavlja težnju prema idealnom obliku krila u točno određenoj fazi leta. U ovisnosti s određenom fazom leta, određuje se napadni kut krila. Danas, a i u budućnosti, veliko značenje imaju odnosno imat će uređaji za povećanje uzgona, iz razloga što omogućuju veću brzinu, manju potrošnju goriva i što više skraćuju potrebnu duljinu staze za polijetanje i slijetanje.

KLJUČNE RIJEČI: morfoza; krilo; aerodinamičke performanse; nova tehnološka rješenja

# SUMMARY

The wing is main aerodynamic surface and structural part of aircraft surface that shape has a major influence on aerodynamic performances of an aircraft. To achieve better aircraft characteristics, it is very important to develop new technical solutions for the wing construction. The morphing of the wing of the aircraft represents the aspiration to the ideal wing shape at the exact phase of the flight. Depending on the flight phase, the attacking wing angle is determined. Today, and in the future, they will have great meanings, or they will have lifting gears, because they allow for faster speed, lower fuel consumption and shorten the minimum length of the runway necessary for taking off and landing.

KEY WORDS: morphing; wing; aerodynamics performance; new technical solutions

# SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
2.	PREGLED RAZVOJA MORFOZE KRILA ZRAKOPLOVA .....	3
2.1.	Krilo i aerodinamika zrakoplova .....	3
2.2.	Vrste krila zrakoplova .....	9
2.3.	Idejni začeci morfoze krila zrakoplova .....	11
3.	RAZVOJ I DIZAJN MORFOZE ZRAKOPLOVNIH STRUKTURA .....	15
3.1.	Rotacija odabranih segmenata krila ili cijelog krila .....	16
3.1.1.	MAS .....	18
3.1.2.	NextGen koncept .....	20
3.2.	Izvlačenje i produljenje krila .....	23
3.3.	Napuhavanje krila .....	24
4.	PROJEKTI MORFOZE KRILA .....	25
4.1.	AWIATOR projekt .....	25
4.2.	AWW projekt .....	28
4.3.	NASA X - 1 .....	29
4.4.	HECS .....	30
5.	ZAKLJUČAK .....	32
	LITERATURA .....	32
	POPIS SLIKA .....	32

# 1. UVOD

Pod pojmom zrakoplov se podrazumijeva zračna letjelica koja je teža od zraka s nepomičnim krilima i vlastitim pogonom. U većem dijelu zrakoplovne struke zrakoplov češće nazivamo avion jer pod nazivom zrakoplov se smatraju sve zračne letjelice bilo da se gibaju vlastitim pogonom ili su nošene zračnim strujama u zemljinoj atmosferi. Održavanje u zraku kod zrakoplova se postiže zahvaljujući aerodinamičkom uzgonu. Zbog kretanja zrakoplova prema naprijed, zrak opstrujava oko krila zahvaljujući posebnom obliku krila te tako nastaje razlika tlakova s njihove gornje i donje strane što rezultira uzgonom usmjerenim prema gore. Ta se sila suprotstavlja težini zrakoplova. Osim djelovanja sile uzgona i sile težine da bi zrakoplov mogao poletjeti i održati se u zraku, sa ili bez pogona vlastitih motora djeluju još i potisna sila i sila otpora.

Konstruktivski element koji omogućuje zrakoplovu dovoljan uzgon da bi se odvojio od tla zove se krilo. Krilo je najvažniji dio i noseća površina zrakoplova na kojoj se stvara sila uzgona razlikom tlakova na gornjaci i donjaci. O krilu ovise letna svojstva te osim njihova profila bitan je i njihov tlocrtni oblik, koji može biti različit, od pravokutnog, trapeznog, strelastog do trokutastog. Postoje i zrakoplovi kojima se geometrija krila može mijenjati, čak i tijekom leta. Od početaka zrakoplovstva 1903. godine krilu kao jednom od najvažnijih elemenata zrakoplovne konstrukcije nije se posvećivala posebna pažnja. No, danas mnoge zrakoplovne kompanije koje imaju svoje inovatore i dizajnere zahvaljujući istraživačkim metodama, posebnu pozornost su usmjerili na kretanje ptica u zraku i njihovim krilima koja mijenjaju oblik u različitim vremenskim uvjetima, npr. za vrijeme pojačanog vjetera. Zahvaljujući tim istraživanjima i promatranju ptica u letu došlo se do novih tehnoloških rješenja i programa u konstrukciji krila. Pritom se najviše ističu promjene oblika krila tijekom leta tj. morfoza krila zrakoplova.

Predmet istraživanja je morfoza krila zrakoplova.

Svrha i cilj ovog završnog rada je prikazati podrijetlo morfoze krila, razvoj i dizajn morfoze zrakoplovnih struktura, te rješenja pri konstruiranju krila zrakoplova, odnosno najnovije projekte.

Materija rada izložena je u 5 poglavlja.

1. Uvod
2. Povijesni pregled razvoja morfoze krila zrakoplova
3. Razvoj i dizajn morfoze zrakoplovnih struktura
4. Projekti morfoze krila
5. Zaključak

U uvodnom dijelu rada je definirana problematika istraživanja, definirani su cilj i svrha istraživanja zrakoplovnih struktura, te je predložena struktura rada.

U drugom poglavlju opisan je povijesni pregled razvoja morfoze krila zrakoplova, te je opisana geometrija svojstva krila i aeroprofila i vrste krila zrakoplova.

Treće poglavlje opisuje razvoj i dizajn morfoze zrakoplovnih struktura.

U četvrtom poglavlju opisani su projekti morfoze krila kao što su AWIATOR projekt, AAW projekt, NASA – X nova serija budućih zrakoplova i HECS.

U petom, zaključnom dijelu rada, predloženi su rezultati istraživanja prema pojedinim segmentima rada.

## **2. PREGLED RAZVOJA MORFOZE KRILA ZRAKOPLOVA**

Krilo je glavna aerodinamička noseća površina zrakoplova čija je primarna svrha stvaranje sile uzgona i o njemu najviše ovise letna svojstva. U konstrukcijskom smislu krila se najčešće sastoje od jedne ili više ramenjača<sup>1</sup> usporedno s kojima se nalaze i uzdužnice.<sup>2</sup> U poprečnu naramenjaču smještena su rebra krila, koja se najčešće pružaju u smjeru uzdužne osi zrakoplova. Konstrukciju prekriva oplata ili pokrov koji krilu daje i konačan aerodinamičan oblik. Na napadnom prednjem rubu krila mogu biti smještena pretkrilca, a na izlaznom zakrilca, koja služe za povećanje uzgona krila kada je brzina zrakoplova mala, tj. u polijetanju i slijetanju. Na izlaznom se rubu nalaze krilca kojima se zrakoplov okreće oko uzdužne osi. [1]

Ako se zanemari mit o Dedalu i njegovom sinu Ikaru povijest zrakoplovstva započinje u staroj Kini. Prve leteće naprave bili su zmajevi u 3. tisućljeću pr. Kr., a maleni baloni punjeni toplim zrakom u 2. i 3. tisućljeću pr. Kr. U renesansnom razdoblju pojavile su se prve ozbiljne zamisli o napravama koje bi omogućile čovjeku kretanje zrakom. Tako je Leonardo da Vinci proučavao let ptica, te idejno razradio konstrukcije više letećih strojeva. Godine 1903. zrakoplov braće Wright (slika 1. ) bio je pogonjen motorom s unutarnjim izgaranjem, a uključivao je i neke vrlo suvremene elemente, kao što su male prednje aerodinamičke površine (tzv. kanari) te upravljanje deformiranjem krila, nisu postojala klasična krilca, a zrakoplovom su upravljali u ležećem položaju. Nakon braće Wright možemo reći da zračni prijevoz bilježi početak svog razvoja. U početku se zračni prijevoz koristio isključivo u vojne svrhe, ali nakon Prvog svjetskog rata Europa razmatra mogućnost uporabe u civilne svrhe za prijevoz putnika i robe. Modificirani vojni zrakoplovi polako se povlače iz prometa, a uvode se novi i ekonomičniji zrakoplovi s 8 – 15 sjedala ili do 2 tona korisne nosivosti, osnivaju se zrakoplovne kompanije i natječu se luksuznom ponudom. [2]

### **2.1. Krilo i aerodinamika zrakoplova**

Krilo je glavna aerodinamička noseća površina zrakoplova na kojoj se stvara sila uzgona. Najvažniji je i najčešće najteži dio zrakoplova. O njegovoj konstrukciji i aerodinamičkim osobinama ovise i osobine cijelog zrakoplova. Krilo predstavlja složen prostorni nosivi sustav. U prošlosti materijali od kojih su se izrađivala krila zrakoplova i sam zrakoplov su bili tkanina, drvo

---

<sup>1</sup> Ramenjača – nosivi element koji se pruža cijelim rasponom krila.

<sup>2</sup> Uzdužnica – gredni nosač znatno manjeg poprječnog presjeka od ramenjače.

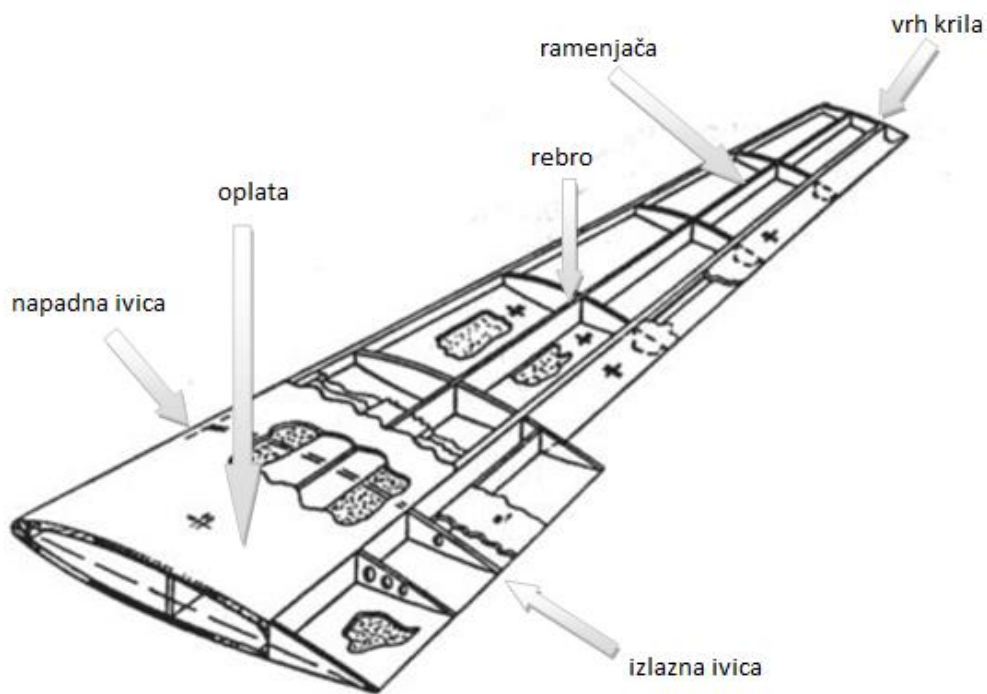


i čelik zbog toga što u to doba nije bilo dostupno korištenje širokog spektra materijala. Zatim, nakon razvoja zrakoplovstva primjenjuju se novi materijali kao što su lagane slitine, čelici visoke otpornosti, razne plastične komponente velike čvrstoće, kompozitni materijali i dr. Kompozitni materijali sastoje se od jakih vlakana, kao što su staklena ili ugljična vlakna postavljena u matricu s plastikom ili epoksidnom smolom, koja ih mehanički i kemijski štiti. Osim metala i kompozitnih materijala potrebno je zrakoplov zaštititi bojama i lakovima zbog otpornosti materijala na koroziju, zamor, djelovanje okolnog zagrijavanja i atmosfere.

Važno je poznavati osobine pojedinog materijala zbog sile opterećenja koja djeluje na zrakoplovnu strukturu te uzrokuje da se elementi razvlače, izvijaju, pucaju ili stlaču. Osnovne osobine materijala koje se mogu promatrati pri djelovanju vanjske sile su čvrstoća, elastičnost, plastičnost, rastezljivost (žilavost) i krutost. Najvažnija je čvrstoća i specifična težina materijala.

Kada se govori o čvrstoći misli se na sposobnost materijala da bez otkaza podnese i odupre se djelovanju vanjske primijenjene sile. Elastičnost je sposobnost materijala da se povrati u početni oblik i dimenzije nakon što na njega prestanu djelovati sile. Što se tiče plastičnosti, to je obrnuto od pojma elastičnosti i kada se elastični materijali deformiraju preko granice elastičnosti, prošli su plastičnu deformaciju. Rastezljivost se mjeri postotkom rastezanja od početka dimenzije i to je sposobnost materijala da se deformira bez pucanja. Krutost je obrnuto od rastezljivosti. Kruti materijal ne može promijeniti oblik pri djelovanju opterećenja, već puca uz malo ili nikakvo prethodno upozorenje. Ploha stakla je dobar primjer krutog materijala. Zrakoplovni materijal ne smije biti prekrut, već mora promijeniti oblik pod djelovanjem najčešće velikih opterećenja.

Glavni elementi konstrukcije krila koje možete vidjeti na slici 1. su: ramenjača, rebra, uzdužnice, oplata, napadna ivica, izlazna ivica, vrh krila, krilca, zakrilca, pretkrilca, aerodinamička kočnica, winglet, vorteks generatori, itd. [3]



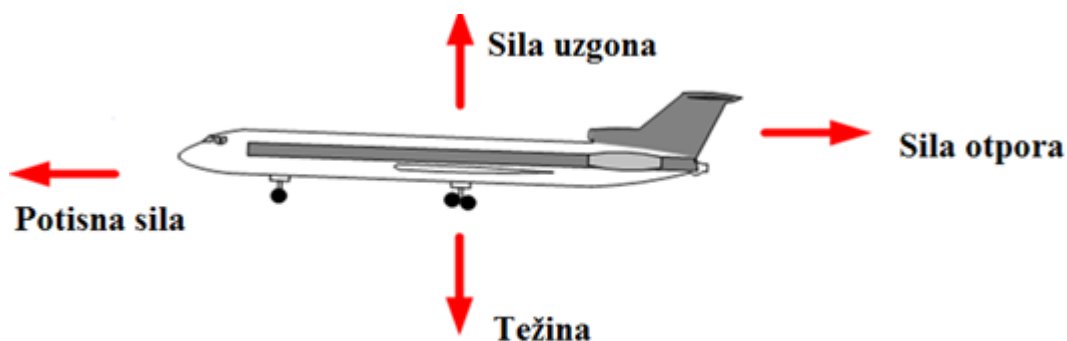
Slika 1. Elementi konstrukcije krila

Izvor:

[https://www.fsb.unizg.hr/miv/nastava/zrakoplovstvo/Jedrilice\\_i\\_zmajevi/seminari/09\\_medic\\_srdjan\\_konstrukcija\\_jedrilice.htm](https://www.fsb.unizg.hr/miv/nastava/zrakoplovstvo/Jedrilice_i_zmajevi/seminari/09_medic_srdjan_konstrukcija_jedrilice.htm), (15.06.2017.)

Stvaranje aerodinamičke sile uzgona čini funkcija krila, što govori da je krilo osnovni element zrakoplova. Krilo je podvrgnuto statičkim i dinamičkim opterećenjem i to se može dokazati pomoću sile uzgona jer sila uzgona mora biti dovoljno velika da održi zrakoplov u zraku kad leti pri maksimalnoj dopuštenoj težini. Uzon pridonosi najvećem opterećenju krila, i to na savijanje. Na zrakoplov tijekom leta djeluju četiri sile prikazane na slici 2.:

- Sila uzgona –  $F_z$ ,
- Sila otpora –  $F_x$ ,
- Težina –  $G$ ,
- Vučna ili potisna sila –  $F_t$ .

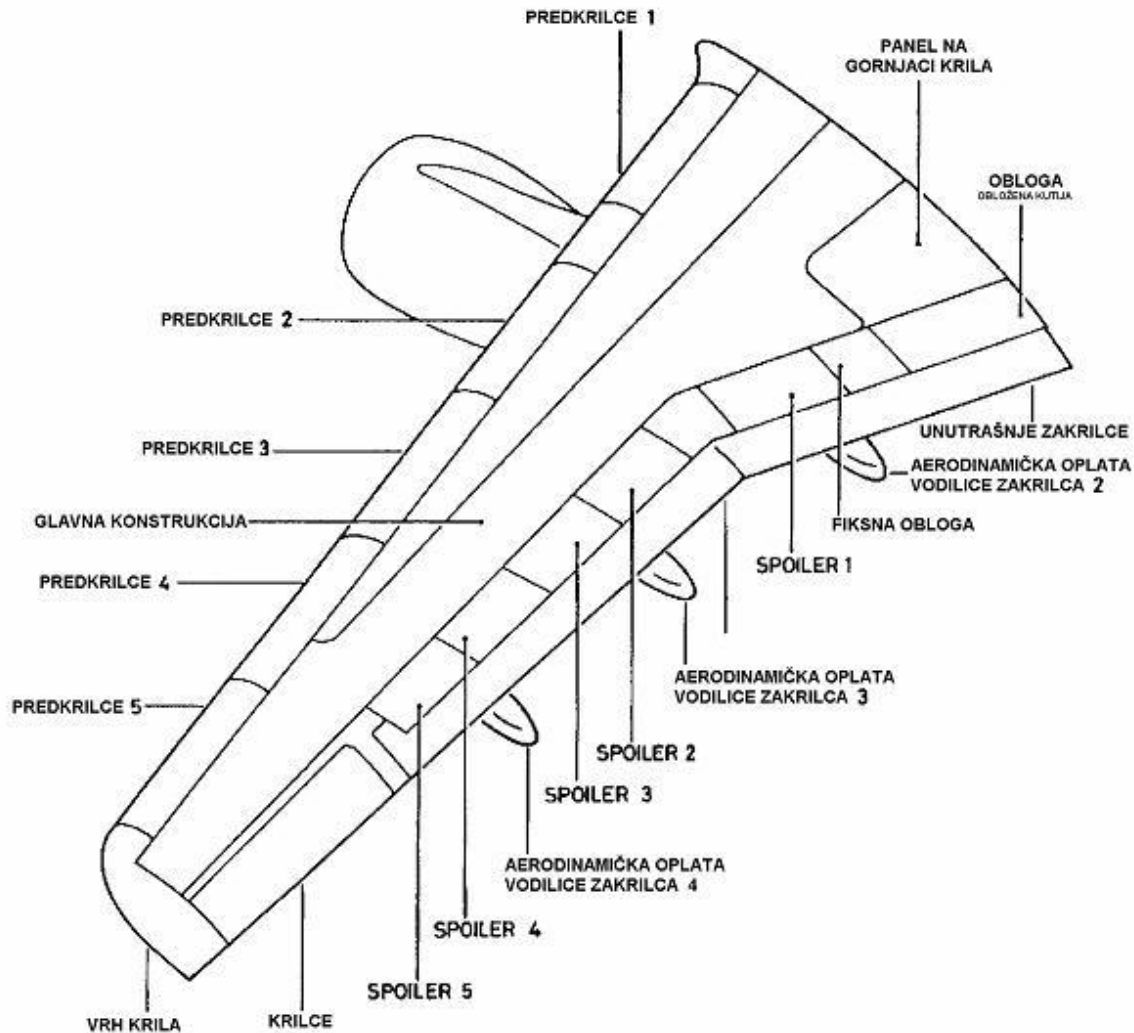


Slika 2. Djelovanje 4 sile na zrakoplov

Izvor: <http://rookieelectronics.com/the-aerodynamics-of-flight-how-does-a-plane-fly/> (20.8.2017.)

Sila uzgona poništava težinu zrakoplova, a sila potiska (vučna sila) poništava silu otpora. Sila uzgona nastaje na krilima zrakoplova te svojim oblikom i većom zaobljenošću gornje površine, krilo stvara razliku u tlakovima. Čestice zraka na gornjoj strani krila imaju veću brzinu nego na donjoj strani krila. U području većih brzina mora biti manji tlak, tlak na gornjaci će biti manji od tlaka na donjaci te će se zbog ove razlike tlakova formirati sila koja se naziva uzgon. Raspodjela tlaka oko aeroprofila može se prikazati pomoću koeficijenta tlaka  $c_p$ . Najvećim dijelom krilo formira uzgon. Sila uzgona može se povećati tako što se na zrakoplov ugrade pretkrilca i zakrilca, kao i povećanjem napadnoga kuta krila. Zbog težnje za sve većim brzinama zrakoplova nužan je razvoj krila, odnosno promjene oblika, profila, materijala i dodavanja dodatnih mehanizama za povećanje uzgona i otklanjanja otpora.

Težina zrakoplova je suprotna sila od sile uzgona, a predstavlja ukupnu masu zrakoplova te odgovara gravitacijskoj sili tj. sili teže (slika 3.). Za kretanje zrakom potrebna je sila potiska koja se definira kao sila koju stvaraju motori zrakoplova. Pojavom sile potiska pojavljuje se i otpor. Otpori nastaju kad viskozni fluid struji oko tijela. Postoje dvije vrste otpora: otpor trenja i otpor oblika ili tlačni otpor. Otpori trenja i otpori oblika zajedno tvore otpor profila. Krilo je profil konačne dužine i ukupni otpor se sastoji od otpora profila i induciranog otpora. Na krajevima krila se javlja prestrujavanje iz područja višeg tlaka prema području nižeg tlaka, te dolazi do vrtloženja zraka i nastajanja induciranog otpora. Kod većih brzina strujanja dolazi do znatnog utjecaja stišljivosti zraka, pa dolazi i do pojave udarnih valova i nastaje otpor zbog stlačivosti zraka i udarnih valova, a pri spajanju dva aerodinamička elementa zbog međudjelovanja nastaje otpor interferencije. [2]



Slika 3. Mehanizacija krila

Izvor: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/74/Krilo\\_A\\_319.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/74/Krilo_A_319.jpg) (15.06.2017.)

Potisna sila na zrakoplov se formira od pogonskog sustava koji pokreće zrakoplov i održava mu brzinu i let. Pogonski sustav, s obzirom na vrstu motora i mjesto izgaranja goriva koje koristi, može biti klipni, mlazni ili raketni. Kod mlaznih motora pogon nastaje unutrašnjim izgaranjem smjese goriva i zraka, te istjecanje nastalog mlaza velikom brzinom kroz posebno oblikovane mlaznice. Zrak ulazi u rotirajući kompresor kroz usisnik zraka. U kompresoru se prije ulaska u komore izgaranja zrak komprimira i pod pritiskom miješa s gorivom. Proces izgaranja dovodi do velikog porasta temperature, a vrući plinovi stvoreni gorenjem prolaze velikom brzinom kroz turbinu i okreću je, te kroz ispušnu cijev izlaze iz motora. Turbina pokreće kompresor s kojim je spojena preko osovine. Efikasnost mlaznog motora najviše ovisi o omjeru ulaznog pritiska u kompresor i komprimiranog zraka prije ulaska u komore izgaranja te ulazne temperature na turbinu.

Dijelovi mlaznog motora su: usisnik zraka, kompresor, osovina, komora izgaranja, turbina, mlaznica. [4]

Osim navedenih sila, na zrakoplov u letu djeluje i moment sile. Moment je sprega sile i kraka na kojem djeluje. Za uravnoteženje zrakoplova važno je da je zbroj momenata na osi y jednak nuli. Os y zamišljena je crta koja prolazi uzduž raspona krila. Ako nos zrakoplova ima moment poniranja, taj moment se naziva negativnim, a ako ima moment podizanja, govori se o pozitivnom momentu. Po osi y na zrakoplov djeluje raspored tereta koji je u njega ukrcan i pomiče težište prema naprijed ili natrag. Da bi moment bio jednak nuli, potrebno je izračunati položaj težišta koji se izražava u postocima srednje aerodinamičke tetive (Mean Aerodynamic Chord), a izražava se s % MAC.

Zrakoplov u ustaljenom horizontalnom letu je sila uzgona koja je jednaka težini zrakoplova i odgovara:

$$F_z = G = \frac{1}{2} \rho_{\infty} \cdot v_{\infty}^2 \cdot S \cdot c_z \quad (1)$$

Gdje su:

$F_z$  = sila uzgona [N]

$G$  = gravitacijska sila [N]

$\rho_{\infty}$  = gustoća zraka (ovisna o razini leta) [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v_{\infty}$  = beskonačna brzina [m/s]

$S$  = nosiva površina [ $\text{m}^2$ ]

$C_z$  = koeficijent uzgona

Proizlazi da je brzina leta zrakoplova jednaka :

$$v_{\infty} = \sqrt{\frac{2G}{\rho_{\infty} \cdot S \cdot c_z}} \quad (2)$$

Da bi se smanjila dužina staze za polijetanje i slijetanje, potrebno je smanjiti brzinu leta pri kojoj se zrakoplov održava u zraku na minimum. Za smanjivanje brzine leta potrebno je povećati koeficijent uzgona. Kod krila određenog profila najveći koeficijent uzgona se dobije kod kritičnog napadnog kuta. Najmanja brzina koja se pri tome postiže se zove brzina sloma uzgona, koja je jednaka:

$$v_{stall} = \sqrt{\frac{2G}{\rho_{\infty} \cdot S \cdot c_{z,max}}} \quad (3)$$

Gdje su:

$V_{stall}$  = brzina sloma uzgona [m/s]

$C_{zmax}$  = ograničenje koeficijenta uzgona u poletnoj/sletnoj konfiguraciji

Za daljnje povećanje koeficijenta uzgona koriste se posebni mehanizmi koji se u pravilu rabe samo kod polijetanja i slijetanja. Takvo krilo u fazi krstarenje ima standardni oblik jer većina mehanizama koji povećavaju maksimalni koeficijent uzgona ujedno povećavaju i otpore. Povećanje otpora nije poželjno kod polijetanja jer se produžuje potrebna duljina staze za polijetanje. Kod slijetanja povećanje otpora ima pozitivnu osobinu jer povećava strminu planiranja zrakoplova prilikom približavanja za slijetanje. Najvažnije vrste mehanizama za povećanje uzgona su: pretkrilca, zakrilca, uređaji za kontrolu graničnog sloja, pokretni napadni i izlazni rubovi krila. [2]

## 2.2. Vrste krila zrakoplova

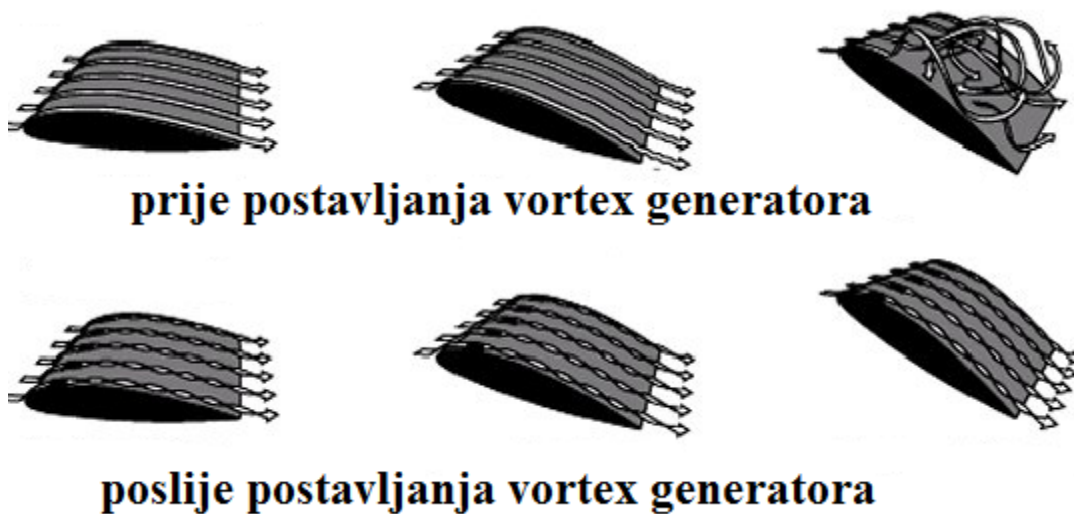
Na aerodinamiku zrakoplova najviše utjecaja ima samo krilo, odnosno aeroprofil krila. Oblici krila su pravokutni, pravokutni sa zaobljenim krajevima, elipsasti, trapezni sa zaobljenim krajevima, strelasti, normalno strelasti, trapezno strelasti sa strijelom naprijed, trapezno strelasti sa strijelom unatrag, delta oblik, duplo delta. Veliki broj aeroprofila je standardiziran, odnosno definiran im je oblik i ispitana aerodinamička svojstva. Što se tiče laminarnih aeroprofila kod podzvuknih brzina i kod malih napadnih kutova najveći dio otpora aeroprofila predstavlja površinski otpor trenja. Laminarni granični sloj ima manje površinske otpore od turbulentnog graničnog sloja. Otpor profila je moguće smanjiti ako se osigura produljenje laminarnog graničnog sloja, odnosno da se projektira takav aeroprofil kod kojeg će se točka preobražaja u turbulentno strujanje pojaviti što kasnije. Osjetljiviji su na točnost izvedbe konture krila, hrapavost i stanje aerodinamičkih površina, tj. nečistoća aeroprofila.

Superkritični aeroprofil su oblikovani da povećaju Machov broj divergencije otpora što bliže  $Ma = 1$ . Imaju gotovo ravnu gornjaku koja je zbog toga povoljna za stvaranje manjih lokalnih brzina strujanja. Zbog toga je slabiji udarni val i otpori su manji. Prednji dio aeroprofila ima negativnu krivinu što smanjuje uzgon. Za nadoknađivanje uzgona koristi se veliko povećanje krivine na 30% stražnjeg dijela koje se izvodi u obliku roga.

Kada se govori o strelasim krilima povećanjem Machovog kritičnog broja povećava se i broj divergencije otpora, a i ukupni otpori u okozvučnom području značajno smanjuju. Povećanje kuta strijele krila povećava  $Macr$ , a u krozzvuknom području smanjuje otpor, smanjuje gradijent krivulje uzgona i smanjuje  $C_{zmax}$ .

Delta krila pokazuju posebnu efikasnost za nadzvučne brzine. Konstrukcija krila mora biti takva da strijela krila budu unutar Machovog konusa kako bi se mogao postići željeni efekt smanjenja otpora. Nedostaci delta krila su konstrukcijske naravi, loše značajke zbog osjetljivosti na odvajanje strujnica na dozvučnim brzinama i lošija upravljivost pri operaciji slijetanja.

Jedna od mogućnosti sprječavanja ranog odvajanja graničnog sloja pri letu brzinama većim od Machovog kritičnog broja je postavljanje vortex generatora na krilo. Na slici 4. je prikazan protok zraka prije i nakon postavljanja vortex generatora. Vortex generatori su mali limeni kutnici postavljeni pod kutom od 15-20° u odnosu na pravac strujanja. Izazivanjem vrtloženja oni povećavaju kinetičku energiju graničnog sloja i time sprječavaju prerano odvajanje strujnica. [5]



Slika 4. Protok zraka prije i nakon postavljanja vortex generatora

Izvor: <https://aviation.stackexchange.com/questions/13876/what-is-a-vortex-generator>,  
(17.06.2017.)

Svako krilo mora zadovoljiti određene uvjete da bi zrakoplov poletio. To su aerodinamički, konstrukcijski, eksploatacijski i tehnološki uvjeti. Aerodinamičke uvjete obuhvaća konstrukcija krila koja mora omogućiti postizanje što većeg uzgona uz što manji otpor, stoga treba izabirati aeroprofile koji će odgovarati tim zahtjevima. Od krila se zahtijeva da osigura poprečnu stabilnost, osobito pri velikim napadnim kutovima u letu. Završetak krila treba biti izveden tako da se što više smanji inducirani otpor. Konstrukcijski uvjeti sastoje se u maloj težini, dovoljnoj jačini i krutosti krila i mogućnosti točne veze konstrukcije krila s ostalim dijelovima zrakoplova. Eksploatacijski uvjeti sastoje se u mogućnosti maksimalnog iskorištenja unutrašnjosti krila, dobar je pristup dijelovima koji se opslužuju, laki popravci, eksploatacija u svim godišnjim dobima i mogućnost

čuvanja na otvorenom prostoru. Tehnološki uvjeti moraju biti izrađeni što brže, jeftinije i moraju biti jednostavni i laki.

Zrakoplovi se prema broju krila dijele na: jednokrile, dvokrile, trokrile, četverokrile i višekrile. Jednokrile se prema položaju krila u odnosu na trup još dijele na niskokrile, srednjevkrile, rameno krilo, visokokrile i parasol krilo. Kod zrakoplova s više krila, krila se najčešće postavljaju jedna iznad drugih, ali mogu biti i jedno iza drugog. Kada se krila nalaze na različitim razinama ili u tandemu na istoj razini, nazivaju se „stagger“.

## **2.3. Idejni začeci morfoze krila zrakoplova**

Morfoza označava bilo kakvu promjenu oblika ili transformaciju krila tijekom leta, no kada se govori u kontekstu projekta morfoze krila zrakoplova, ona označava učinkovitu prilagodljivost zrakoplova svim režimima leta. Osim što označava i razne promjene u odnosu na konvencionalne konstrukcije zrakoplova kao što su mehanički jednostavnije konstrukcije i konstrukcije manjih težina koje daju učinkovitije iskorištenje energije i bolju pokretljivost. Promatranje leta u prirodi je potaknulo ljudsku želju za letenjem, te u konačnici razvoj zrakoplovstva. Usporedbom zrakoplova s prirodom, promatrajući ptice u letu, dizajneri traže inspiraciju kako bi postigli jednostavnost, eleganciju i učinkovitost promatrajući ptice kako su u stanju brzo mijenjati oblik iz učinkovitog krstarenja do agresivnog manevriranja. [6]

Nedavni razvoj u zrakoplovstvu "pametnim" materijalima može nadvladati ograničenja i poboljšati prednosti postojećih dizajnerskih rješenja. Izazov je dizajnirati strukturu koja nema razlike između strukture i sustava pokretanja, ali je također u mogućnosti promijeniti oblik. Miješanjem morfiranja i pametnih struktura u integriranom pristupu zahtijeva multidisciplinarno razmišljanje od ranog razvoja, što značajno povećava ukupnu složenost, čak i na preliminarnom dizajnu. Morfiranje je obećavajuća tehnologija za buduće zrakoplove nove generacije. Međutim, proizvođači i krajnji korisnici još su uvijek skeptični za prednosti za usvajanje morfiranja u bliskoj budućnosti. Mnogi razvijeni koncepti imaju razinu spremnosti za tehnologiju koja je još uvijek velika.

Tim stručnjaka iz američke agencije za aeronautiku i svemir, točnije NASA (National Aeronautical and Space Administration), zaduženih za poboljšanja zrakoplovnih krila i performansi te općenito svih parametara leta zrakoplova, uspjeli su napraviti projekt o mogućnosti mijenjanja oblika krila tijekom leta zrakoplova. U svom zadatku su bili inspirirani analizama stručnjaka i znanstvenika iz Europe o letu crnih čiova i orlova. Ove ptice za vrijeme svog leta mijenjaju oblik krila koji odgovaraju režimu leta, kao što se vidi na slici 5, tako pri slijetanju na vrh drveća ili pri lovljenju insekata u zraku. Te ptice koje provode skoro cijeli svoj životni vijek u letu, pa čak i tako spavaju, najviše koriste oblik svojih krila u letu. [7]





Slika 5. Orao u letu

Izvor: <http://www.ptice.info/teme/13/>, (15.06.2017.)

Radeći istraživanja o ovim pticama i mijenjanju oblika krila za vrijeme leta, znanstvenici iz Europe su pokazali da ove ptice trostruko poboljšavaju svoje performanse u letu što čini morfozu krila. Ptice tijekom sporijeg leta imaju ispružena krila, te tako pružaju maksimalnu učinkovitost leta i lete skoro duplo dalje. Kada bi svoja krila približili uz tijelo dalje od glave, u obliku strijele, došlo bi do boljih aerodinamičkih performansi te bržeg i pravocrtnog leta. Približena krila uz tijelo su također služila za brza i nagla skretanja i nagibe u zraku jer zbog toga u režimu letenja dolazi do velikih sila i do četiri puta veće tjelesne težine ptice, te bi se ispružena krila slomila. Ovi rezultati su dali poticaj za zrakoplovnu industriju da se pokuša izraditi zrakoplov koji može u letu učinkovito mijenjati oblik svojih krila ovisno o režimu letenja i tako poboljšati performanse, ali mogu uzrokovati kompromitiranje performansi za određene segmente misije zbog geometrije čvrstog krila. Dok su neki uređaji, kao što se zakrilca koriste za povećanje geometrije krila, razvijaju se novi materijali koji bi mogli omogućiti značajnu sposobnost morfiranja krila.

Projekt morfoze krila zrakoplova agencije NASA-e je temeljen upravo na gore navedenim činjenicama, te je težio konceptu s integriranim naprednim tehnologijama u cilju učinkovitog i višestruko prilagodljivog zračnog ili svemirskog vozila. Projekt morfoze krila zrakoplova zahtijeva razne pristupe sa makro, mikro, aerodinamičkih i strukturalnih stajališta. Sve ove promjene omogućuju puno više novih uloga zrakoplova koji se prilagođavaju svim mogućim režimima leta, te tako uspješno i učinkovito obavljaju svoje uloge u granicama sigurnosti. [8]

Napredak pametnih struktura i aktivnih materijala tijekom posljednjeg desetljeća može donijeti značajne promjene od načina na koji su zrakoplovi trenutačno projektirani. Te tehnologije mogu pružiti nove načine mijenjanja geometrije krila tijekom leta, a neke od tih tehnologija pokazale su

se u eksperimentalnim programima. DARPA<sup>3</sup>-ovom programu Morphing Aircraft Structures (MAS) je cilj dobiti značajne promjene geometrijskih oblika krila tijekom leta pomoću naprednih aktuatora i uređaja. Ovaj program je još uvijek u razvoju te planira uključiti demonstraciju zračnog tunela koji može pratiti let i može dovesti do letne demonstracije zrakoplova s morfozom krila.

Značajne geometrijske promjene krila zrakoplova tijekom leta mogu omogućiti učinkovitu izvedbu tijekom različitih vrsta leta. Trenutačni zrakoplovi koriste konvencionalne aktuatore i mehanizme koji mijenjaju krilni zamah za let u različitim režimima brzine letenja i za produljenje zakrilca tijekom slijetanja i polijetanja mijenjajući područje krila i zakrivljenost. Planirani su napredniji aktuatori koji koriste pametne materijale i prilagodljive strukture koji nastoje promijeniti mnogo više geometrijskih parametara tijekom leta. Na primjer, platforma krila se može mijenjati ako je krilo sposobno mijenjati površinu krila, omjer slike i omjer konusa. Osim toga, mijenjanje krivulje, debljine ili uvijanja moglo bi promijeniti presjek krila. Neke promjene geometrije mogu biti korisnije od drugih, a različite misije mogu jamčiti različite geometrijske promjene. Nadalje, dizajneri ovakvog krila moraju razmatrati različite strategije mehanizacije koje mogu donijeti promjene geometrije.

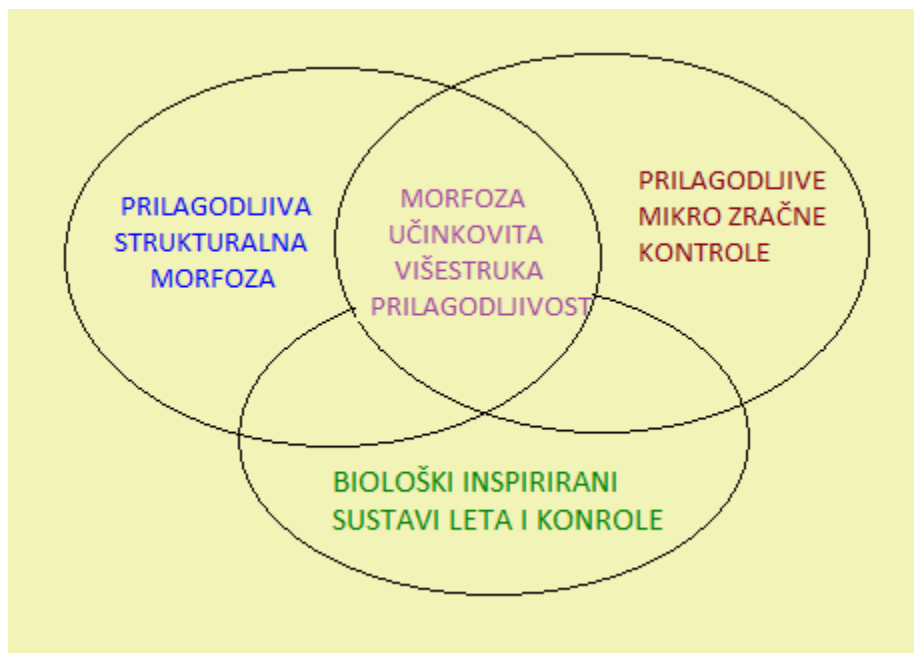
Potrebno je svakako napomenuti da se morfoza ne odnosi samo na promjenu u obliku krila, već se obraća pozornost na aerodinamičke promjene oblika ili strukture da bi integrirali i spojili sve funkcije aerodinamike, strukture i kontrole zrakoplova. Morfoza na nekim tipovima zrakoplova može biti kao strateško usmjeravanje mikro protoka zraka i kontrole strujanja zraka po nekim dijelovima konstrukcije sa ili bez većih promjena u obliku strukture. [8]

Cilj projekta morfoze krila zrakoplova je razvijanje napredne tehnologije i koncept integriranih komponenti koji bi omogućili učinkovitiju i višestruku prilagodljivost leta zrakoplova. Projekt je usmjeren prema planiranim boljim, dugotrajnim, i visoko isplativim tehnologijama s obzirom na svoje potencijale. Projekt koristi najnovije „pametne“ tehnologije koje uključuju sustav pametnih, nano, biološki inspiriranih materijala, istraživanja novih materijala, mikroelektronika i koncepta integriranih komponenata. Slika 6. prikazuje najznačajnija tri područja:

1. prilagodljiva strukturalna morfoza
2. prilagodljiva mikro - zračna kontrola
3. biološki inspirirani sustavi leta i kontrole. [9]

---

<sup>3</sup> DARPA (Defence Advanced Research Project Agency) – Američka agencija za razvoj novih naprednih projekata za vojsku SAD-a.



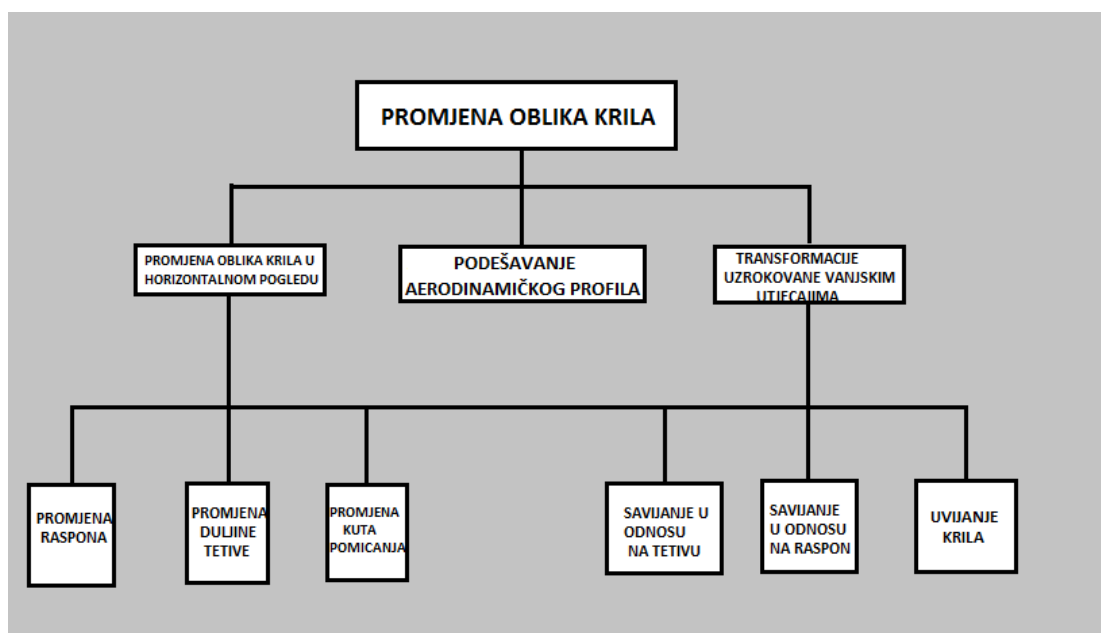
Slika 6. Grafički prikaz cilja projekta morfoze

Izvor: McGowan, A-M. R., Washburn, A. E., Horta, L. G., Bryant, R. G., Cox, D. C., Siochi, E. J., Padula, S. L., Holloway, N. M.: *Recent Results from NASA's Morphing Project*, NASA Langley Research Center, USA, 2008.

Područje prilagodljive strukturalne morfoze sastoji se od razvoja i testiranja multifunkcionalnih i prilagodljivih koncepata krila zrakoplova koja se mogu učinkovito prilagoditi različitim uvjetima leta koristeći pristupe izvan konvencionalnih kontrolnih površina. Istraživanja u području prilagodljivih mikro - zračnih kontrola se fokusiraju na dinamičku promjenu općeg polja opstrujavanja zraka oko zrakoplova tako da se vrši interakcija i kontrola lokalne nestabilnosti protoka zraka i struktura za protok zraka. U području biološki inspiriranih sustava leta i kontrola, fokus je na razumijevanju i prijenosu primjera iz prirode leta ptica u projekt, ali ne potpuno kopirajući biologiju. Područje pametnih tehnologija uključuje systemske studije i istraživanja materijala za razvoj novih „pametnih” materijala za pokretanje i aktivaciju senzora, koncepte sklopa aktuatora, mikroelektronike za napajanje pametnih materijala, te za razvoj i nanošenje raznih pristupa naprednih kontrola za morfozne zrakoplove. Zajedno sva ova gore nabrojana područja uključuju stvaranje novih ili optimiziranje postojećih aktuatora, kontrolnih površina, senzora i ostalih struktura zrakoplova važnih za što bolji i efikasniji let. [9]

### 3. RAZVOJ I DIZAJN MORFOZE ZRAKOPLOVNIH STRUKTURA

Morfoza krila eliminira potrebu za skupim zrakoplovima koji mogu letjeti samo na određenim visinama pri određenim brzinama mijenjajući svoj oblik ovisno o performansi leta. Zrakoplov sa morfirajućim krilima za vrijeme leta vrši relativno male izmjene oblika da bi se postigla što bolja kontrola zrakoplova. Dizajn morfirajućeg krila uključuje rotiranje, klizanje i napuhavanje mehanizama koji mijenjaju svoj oblik. Sadašnji trend u razvoju tehnologije pokazuje da se može postići poboljšanje u veličini zrakoplova, u doletu i performansama leta, što doprinosi smanjenju troškova, manjoj složenosti izgradnje, ali i težine, što se može vidjeti na slici broj 7. Ovo dovodi do mogućnosti prestanka upotrebe konvencionalne kontrolne površine, kao što su krilca. Cilj razvijanja i unaprjeđenja morfirajućeg krila je razvoj modela zrakoplova koji može ispuniti razne misije i funkcije u raznim uvjetima leta. Koncept morfirajućeg krila zahtjeva niz različitih mehanizama kao što su sklapanje, proširivanje, uvlačenje krila, spajanje i razdvajanje više segmenata krila. [8]



Slika 7. Promjena oblika krila

Izvor: [http://www.csun.edu/~pbishay/PDFs/Materials\\_and\\_Design\\_Sofla\\_2010.pdf](http://www.csun.edu/~pbishay/PDFs/Materials_and_Design_Sofla_2010.pdf), (01.07.2017.)

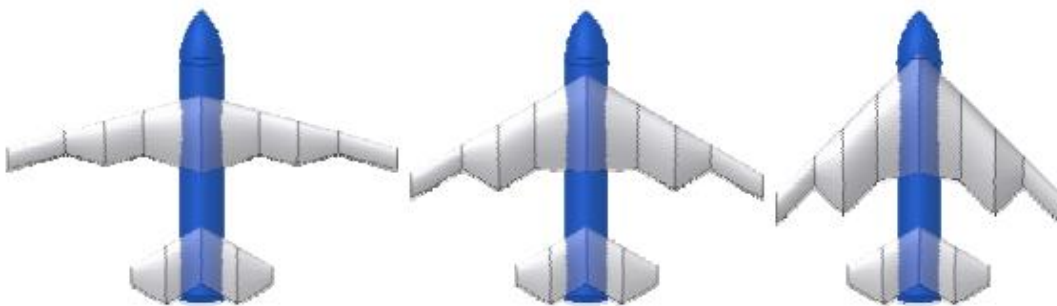
Vrsta dizajna morfirajućeg krila ovisi od osnovnog mehanizma kod kojeg se postižu promjene oblika i funkcije krila, tri su osnovna tipa mehanizma:

1. Rotacija odabranih segmenata krila ili cijelog krila,
2. Izvlačenje krila i
3. Napuhavanje odabranih komponenata krila ili napuhavanje cijelog krila.

### 3.1. Rotacija odabranih segmenata krila ili cijelog krila

Razvoj Z – krila s mogućnosti prijelaza iz potpunog proširenja na poziciju presavijenog krila ptica započeo je 2003. godine. Konstrukciju su odradili Lockheed Martin Skunk Works i AFRL.<sup>4</sup> Konstrukcija krila je takva da zrakoplov, koji koristi ovu vrstu krila bez problema prelazi iz mirnog horizontalnog leta u brzu promjenu visine i brzine s naglim poniranjem, te nakon toga ponovno kasnije u poziciju mirnog leta. Poseban materijal od kojeg se gradi ovakvo krilo čini ga glatkim što povećava njegovu aerodinamičku učinkovitost tijekom leta. [10]

Iste godine kada je Lockheed Martin Skunk Works započeo s razvojem Z-krila, Hypercomp - NextGen proizvodi drugu vrstu morfirajućeg krila, koja ima tri različite promjene položaja krila za vrijeme različitih režima leta. NextGen je razvio „šišmiš krilo“ koncept koji se sastoji od sklopivog krila u ravnini u cilju postizanja određene geometrijske ravnine. Na temelju trenutanih zahtjeva za misijom (npr. krstarenje) jedno krilo je sposobno postići gotovo optimalne oblike krila za svaki segment misije.



Slika 8. N-MAS konfiguracija s tri različite promjene položaja krila za vrijeme različitih režima leta  
Izvor: Neal, D. A.: *Design, Development, and Analysis of a Morphing Aircraft Model for Wind Tunnel Experimentation*, Virginia, 2006.

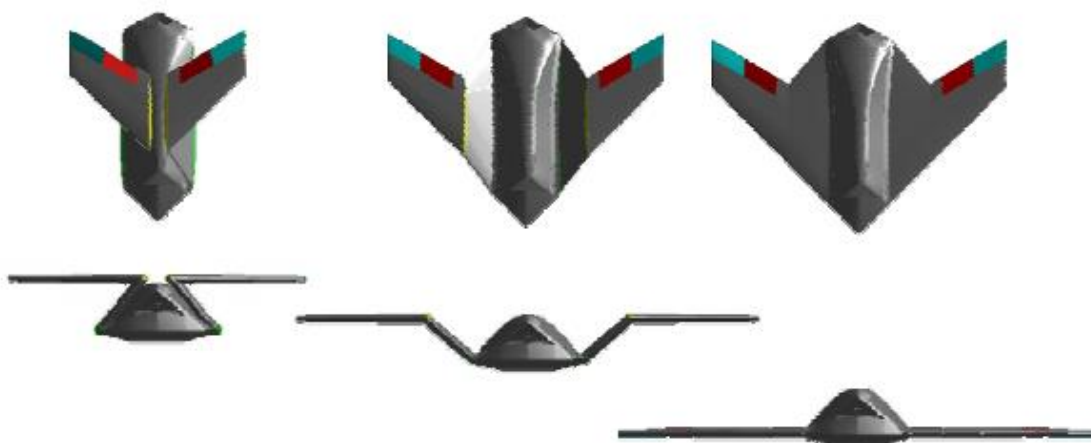
---

<sup>4</sup> AFRL (Air Force-a Research Laboratory) – Istraživački laboratorij zračnih snaga.

Faze leta za koje se krila prilagođavaju radi osiguravanja maksimalnih performansi su:

1. Faza krstarenja – za smanjenje potrošnje goriva i otpora prilikom krstarenja na velikim udaljenostima, vrši se promjena oblika i površine krila smanjujući svoju površinu na minimum, dok se istovremeno vrhovi krila udaljuju na najveću moguću udaljenost od trupa zrakoplova da se dobije što veći odnos uzgona i otpora ( $L/D$ ).
2. Faza „čekanje u letu“ – pošto su ovakvi dizajni najčešće korišteni u vojne svrhe ovaj režim leta se u pravilu koristi za dobivanje informacija ili otkrivanje neprijatelja. U tom slučaju krilo zrakoplova povećava svoju površinu kako bi smanjio potrošnju goriva, zbog toga može više vremena provesti u ovom položaju, a i općenito u letu.
3. Faza ubrzanja – kada je zrakoplov u režimu ubrzanja, zaokreće svoje krilo što više unazad. Na taj način pilot postiže veću brzinu zrakoplova, ali i veću kontrolu nad zrakoplovom. [10]

Lockheed Martin je razvio vanjski zrakoplovni sklopni krilni koncept koji je prvenstveno dizajniran kao faza „čekanja u letu“. Kao što je prikazano na slici 9., postoje dvije osnovne radne točke i jedna posredna konfiguracija za kontrolu vlasti tijekom slijetanja sklapanjem krila na trup. Zrakoplov je u stanju smanjiti svoj krilni razmah za 100 posto i promijeniti projekciju oblika krila u horizontalnom pogledu za 120 posto. Povlačenje krila se pokreće pomoću upravljačkog sklopa zakretnog momenta koji uvodi geometrijsko ograničenje za održavanje razine vanjskog krila kako bi se unutarnja krila preklapa na trup. [10]



Slika 9. Konfiguracija Lockheed Martinova krila

Izvor: Neal, D. A.: *Design, Development, and Analysis of a Morphing Aircraft Model for Wind Tunnel Experimentation*, Virginia, 2006

### 3.1.1. MAS

Razvoj programa morfoze zrakoplovnih struktura započeo je 1920-ih godina prošlog stoljeća (MAS - Morphing Aircraft Structure). Tada je G.T.R. Hill konstruirao svoj Pterodactyl IV. zrakoplov bez repa. Ovaj zrakoplov koji je prikazan na slici 10 je mogao mijenjati kut od 4,75 stupnjeva pomoću ugrađenog mehaničkog sklopa kotačića u trupu zrakoplova. Ova ideja se razvijala godinama, te su nastali razni sustavi slični ovom projektu. Neki od njih su promjena konstruktivnog kuta krila tijekom leta-VSW<sup>5</sup> i promjena kuta nosa zrakoplova Concorde i Tu-144. [11]



Slika 10. Pterodactyl IV.

Izvor: <https://alchetron.com/Westland-Hill-Pterodactyl-4969169-W#->, (15.07.2017.)

NASA je 1990. godine, koristeći istraživanja u morfozi krila od ranije, s vizijama za budućnost, krenula u svoj projekt morfoze krila. Istraživači su radili na zrakoplovu koji spoji svoja krila pri velikim brzinama i produžuje ih za vrijeme polijetanja i slijetanja kako bi postigli što veći uzgon. Projekt je krenuo u njihovom Langley centru za istraživanje, a glavni cilj istraživanja je bio otkrivanje novih tehnologija za morfozu krila zrakoplova. Zadatak stručnjaka je bio razvijanje i ocjenjivanje napredne metodologije i integriranih koncepata komponenti koje će omogućiti učinkovitu geometrijsku prilagodbu krila zrakoplova na razne režime leta. Godine 2004. projekt se širi i nastavlja se istraživanje s drugim industrijskim i vladinim agencijama kao što je agencija DARPA, koja je nastavila MAS program projektom morfoze krila. Njihov cilj je bio integriranja

---

<sup>5</sup> VSW (Variable Sweep Wing) – promjenjiva geometrija krila (promjenjivi konstruktivni kut krila-zrakoplovi F-111, F-14, MiG 23, MiG 27, Su-24, Su-17, itd.).

novih tehnologija koje će omogućiti novi dizajn, konstrukciju i demonstraciju aerodinamički učinkovitih krila. Razvili su karbonska vlakna koja to omogućuju, te takvi „pametni“ materijali omogućuju zrakoplovu bolje aerodinamičke karakteristike i njime je lakše upravljati.

Glavni ciljevi MAS programa su strukturirani tako da omoguće dobre performanse glavnog sustava za brzinu reagiranja, pokretljivost i trajnost leta. Brzina reagiranja se podrazumijeva kao kritično vrijeme koje je potrebno da se uređaji za promjenu oblika aktiviraju i u slučajevima nepredviđenih kriznih situacija. Pokretljivost je brzo i lagano izvođenje letnih manevara kao i sposobnost napada na brze pokretne zračne i zemaljske ciljeve, dok je trajnost leta sposobnost dominacije velikih operacijskih površina u dugom vremenskom periodu.

MAS program je imao dva primarna tehnička cilja:

1. Razvijanje aktivne strukture krila koja bi mijenjala oblik i omogućila veliki raspon aerodinamičkih performansi i letnih kontrola koji nisu bili mogući sa konvencionalnim krilima.
2. Omogućavanje razvoja operacijski učinkovitih zrakoplovnih sustava i flote zrakoplova, sa povećanjem broja operacija koje nisu bile moguće sa konvencionalnim zrakoplovima, uz zajedničko uključivanje operacija mornarice i zračnih snaga.

Osim dva tehnička cilja imao je tri faze programa:

1. faza programa je bila razvijanje koncepta morfirajućih krila koja bi omogućila drugačiju promjenu krila zrakoplova i drugačije performanse leta. Za ovaj posao su bile zadužene tri firme:
  1. Lockheed-Martin (Palmdale, California),
  2. Hypercomp/NextGen (Torrance, California),
  3. Raytheon Missile Systems (Tucson, Arizona).
2. faza programa je bila testiranje modela raznih veličina u aerotunelima tvrtke NASA, sa ciljem da se odredi izvedivost sustava u uvjetima stvarnog leta.
3. faza je bila konstruiranje prototipa za demonstriranje leta i provjeru letnih performansi. Težnja se usmjerila na oblikovanje sustava koji će omogućiti veći stupanj efikasnosti strukture te smanjiti samu težinu krila olakšavanjem elemenata strukture krila. Ova faza je rezultirala promjenom oblika krila, površine krila te promjenom razmaha krila. S tim promjenama, inventirana je nova klasa morfirajućih zrakoplovnih sredstava. [6]



### 3.1.2. NextGen koncept

NextGen Aeronautics je razvila drugi koncept promjenljivog kuta krila, koji je omogućio direktne promjene u korijenu duljine tetive krila. Također, te modifikacije su uključivale promjene kuta zamaha krila čijim bi se pomjeranjem smanjivao razmah krila te promijenio oblik samog krila. Indirektan utjecaj bi uzrokovao promjenu oblika krila gledano s gornje strane te izmjenu vitkosti krila. Ovaj koncept sadrži promjenu kuta zamaha krila i kuta korijena tetive, a prikazan je na slici 11. desno.

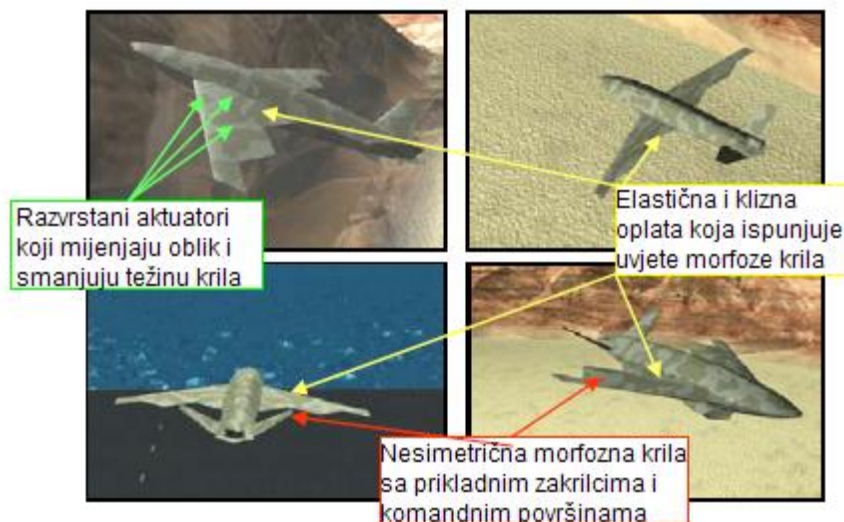


Slika 11. Koncepti morfoze krila zrakoplova MAS programa: lijevo - Lockheed – Martin, desno - NextGen Aeronautics

Izvor: [http://dnc.tamu.edu/projects/flowcontrol/Morphing/public\\_html/darpa.html](http://dnc.tamu.edu/projects/flowcontrol/Morphing/public_html/darpa.html), (15.07.2017.)

Sklapajuće krilo tvrtke Lockheed-Martin se sastoji od zglobnih spojeva na dva mjesta na krilu. Ovi zglobovi omogućuju kruto kretanje oblika krila na sve četiri primarne sekcije (penjanje, krstarenje, „čekanje“ u letu i ubrzanje) dok koncept tvrtke NextGen sadrži promjenjivu konfiguraciju ljuskaste strukture krila sa elastičnom oplatom, za postizanje varijacija oblika krila. Pristup inženjera NextGena pri dizajniranju koncepta morfirajućih krila se temeljio na unutarnjoj transformaciji krila koja su se povećava ili smanjivala. Prilikom konstruiranja površine krila, koristili su se inovativnim materijalima, aktuatorima te kompjuteriziranim kontrolnim sustavima koji izravno utječe na transformaciju krila. Njihova morfirajuća krila su se mogla proširiti i suziti na nekoliko pozicija, „skrivajući“ dio krila unutar trupa. Svaka od ovih pozicija i transformacija krila može dati najefikasniji oblik krila za potrebne aerodinamičke performanse zrakoplova u letu, za sve vrste brzina, ovisno od vrste misije zrakoplova, da li je to izvidnička ili napadna misija.

Slika 12. prikazuje NextGen dizajn morfoze krila. Vidljivo je da se promjenom kuta krila u odnosu na trup mijenja i smanjuje površina krila od oblika efikasnog krstarenja visoke vitkosti do efikasnog oblika letenja sa oštrijim kutom krila u odnosu na trup. Prikazani su osnovni dijelovi, položaj aktuatora, uloga materijala i oplata krila i lokacija komandnih površina. [12]



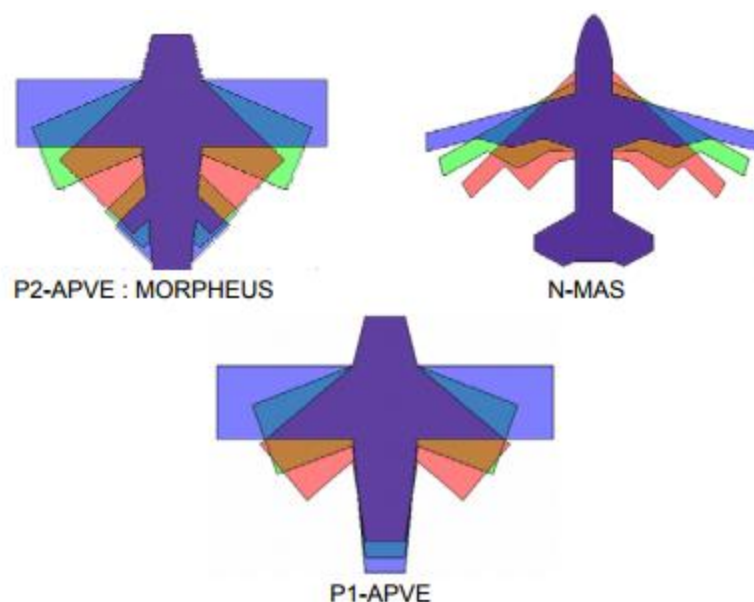
Slika 12. Batwing "krilo šišmiša" - NextGen Aeronautics koncept morfoze krila

Izvor: Weissbarr, T. A.: *Morphing Aircraft Technology – New Shapes for Aircraft Design*, USA.

Kod ove koncepcije morfoze krila tražilo se da dizajn i materijal oplata bude takav da omogućuju veliko rastezanje i sužavanje površine oplata krila. Težilo se da materijal i oplata učinkovito podnose razna opterećenja bez pucanja materijala. Ovdje se oplata krila rasteže i do 100 posto za slijetanja uz mogućnost još većih opterećenja. Materijal korišten kod NextGen koncepta je silikonska elastomerna oplata sa temeljnom vrpčastom strukturom koja poboljšava krutost krila izvan trupa zrakoplova pri rastezanju i do 100 posto, ali i laka i pokretna krilna podstruktura. Sve ovo je omogućavalo postojanje devet elektro-mehaničkih aktuatora, od kojih se svaki sastoji od jednog električnog motora.

Kompozitni materijali zastupljeni su u mnogim granama industrije, čiji udio primjene sve više raste u sustavima koji nas okružuju. Jedan od najstarijih kompozitnih materijala je armirani beton, koji je kao zasebni materijal relativno krut i tvrd materijal, ali se kombinacijom njega i željezne mrežaste konstrukcije koja je elastična dobiva materijal koji ima svojstva oba materijala. Silikonski elastomerni materijali su kompozitni materijali mikro strukturalnog programa s pojačanim vlaknima u strukturi, sa svojstvima da su jako rastezljivi i čvrsti, što je vrlo prigodno za zrakoplovnu industriju. Prilikom razvlačenja krila u položaj ispruženih krila, elastomeri trebaju izdržati sva opterećenja u letu, ona uzrokovana djelovanjem aktuatora kao i vlastita opterećenja materijala na rastezanje. Materijal oplata zrakoplova se može pojačati s karbonom, staklom, aramidom ili nano-pojačanjima. Sam kostur krila zrakoplova je podijeljen u sustav ćelija koje rastezanjem dobivaju oblik paralelograma uz velika svojstva rastezanja i sužavanja bez narušavanja

integriteta okolnih struktura zidova uzdužnica, rebara ili ramenjače. Na slici 13. su prikazani promjenjivi oblici krila kod P2-APVE<sup>6</sup>, N-MAS i P1-APVE.



Slika 13. Promjenjivi oblici krila kod P2-APVE, N-MAS i P1-APVE

Izvor: Neal, D. A.: *Design, Development, and Analysis of a Morphing Aircraft Model for Wind Tunnel Experimentation*, Virginia, 2006.

Zglobni elastični sustav uzdužnica i rebara je linearno razmaknut pri otklonu krila na određenu poziciju te mijenja svoj oblik, a senzori bilježe njihov razmak šaljući stanje i pozicije krila glavnoj kontrolnoj ploči. Napadna i izlazna ivica krila su fiksno povezani s mrežnom strukturom krila i trupa, kao i donekle konvencionalne kontrolne površine s mogućnošću gibanja s obzirom na mijenjanje oblika krila.

Tvrtka NextGen Aeronautics, agencija DARPA, američke zračne snage i tvrtka Boeing su razvili ovaj oblik transformacije oblika krila s osnovnom karakteristikom mijenjanja geometrije krila. Ovakva krila se prilagođavaju brzini kretanja zrakoplova, uz mijenjanje ukupne površine krila za 40 posto, odnosno razmah krila se kreće od 35° u razvučenoj konfiguraciji do 15° u skupljenoj konfiguraciji uz maksimalnu brzinu od 185 km/h. Ove performanse je postigao prvi prototip nazvan MFX-1., što je izazvalo rad na novoj, poboljšanoj MFX-2. Najvažnije poboljšane karakteristike inačice MFX-2 u odnosu na MFX-1 je mogućnost izbora između autopilotskog sustava tvrtke Aero Controls ili daljinskog upravljanja, bolja fleksibilnost, dvomotorni mlazni

---

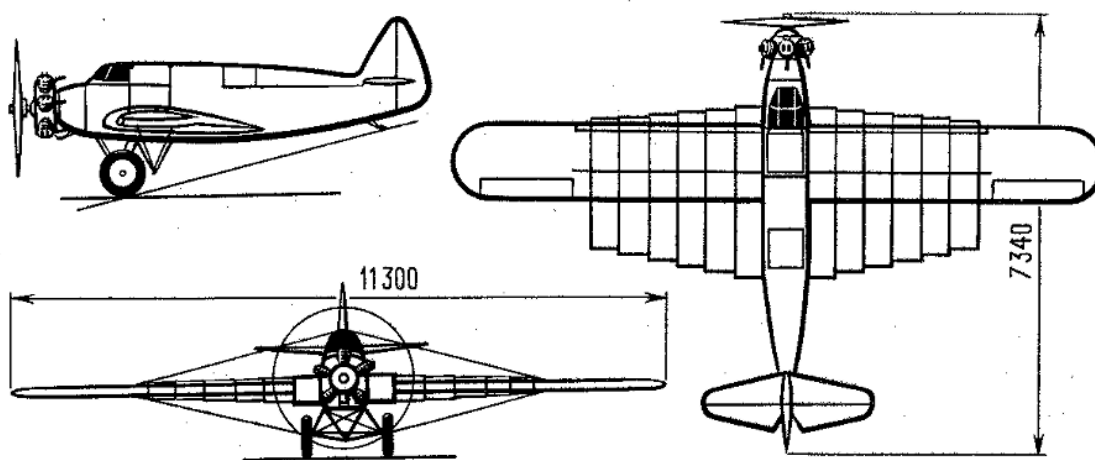
<sup>6</sup> APVE (Adaptive Planform Vehicle Experiment) – prilagođavajući oblik eksperimentalnog objekta.

pogonski sustav, mogućnost promjene razmaha krila do 73 % te promjene vitkosti krila 177 %. Ovaj novi model je imao i promijenjen oblik izlaznih ivica krila, ravniji i jednostavniji oblik izlaznih ivica krila. [10]

### 3.2. Izvlačenje i produljenje krila

Ivan Makhonine, ruski istražitelj, prvi je osmislio ideju za izgradnju izvlačenja i produljenja krila. Postupak izvlačenja krila sadrži jedan ili više dijelova manjeg presjeka koji se uvlače jedan unutar drugog, što rezultira promijeni površine odnosno razmaha krila. Prema tome, uvlačenjem ili izvlačenjem krila, pojavljuje se promjena aerodinamičke učinkovitosti. Godine 1937. završen je koncept izvlačenja krila zrakoplova RK koji je prikazan na slici 14. koji je izgradio G. I. Bakshaev. Zrakoplov je poletio te iste godine i imao teleskopsko krilo koje se ručno uvlačilo i izvlačilo čeličnom žicom iz kokpita. Tijekom leta, svi odvojivi dijelovi bili su potpuno skriveni unutar trupa.

Vanjska ploča krila uvlači se u unutarnju ploču što omogućuje prilagodbu razmaha i površine krila pri velikim brzinama. Za vrijeme polijetanja, slijetanja i ustaljenog horizontalnog leta krila se opet izvlače i tako poboljšavaju performanse ovog zrakoplova. Utjecaj na karakteristiku polijetanja odnosno slijetanja zrakoplova RK bio je impresivan kako kažu dizajneri. Naravno, ova tehnologija se samo može primijeniti na male i spore zrakoplove kada krilo pridonosi samo 20% ukupnog povlačenja. [13]



Slika 14. Zrakoplov RK

Izvor: <http://www.ctrl-c.liu.se/MISC/RAM/rk.html>, (02.07.2017.)

### 3.3. Napuhavanje krila

Za krila koja se mogu napuhati važno je da mogu smjestiti svoje kontrolne površine u prostor sa što manjim volumenom. Napuhavanje krila se izvodi na dva načina. Prvi način je korištenje mekih materijala koji mijenjaju svoje strukture pod djelovanjem sunca, dok je drugi način uz pomoć plina koji reakcijom sa smolom izaziva promjene u strukturi i napuhavanje krila.

Krila na napuhavanje mogu stati u prostor 10 puta manjeg volumena nego obična krila. Snaga i krutost ovog krila kontrolira se unutarnjim tlakom i modulom elastičnosti unutarnjeg materijala. Jedan primjer zrakoplova s ovakvim krilom je Apterion koji je dizajnirao ILC Dover 1970. godine i prikazan je na slici 15. Ovdje se krilo može savijati i mijenjati svoju duljinu. [14]



Slika 15. Napuhavanje krila

Izvor: [https://www.researchgate.net/figure/232271708\\_fig2\\_Figure-11-ILC-Dover-'The-Apterion'-UAV](https://www.researchgate.net/figure/232271708_fig2_Figure-11-ILC-Dover-'The-Apterion'-UAV) (03.07.2017.)

## 4. PROJEKTI MORFOZE KRILA

Morfozu krila uključuje rotiranje, klizanje i napuhavanje mehanizama koji mijenjaju oblik i funkciju krila dovodeći do promjene brzine, manje potrošnje goriva i boljih performansi leta. Sve ovo dokazuje da se može postići poboljšanje u veličini zrakoplova, doletu i performansama leta, uz postizanje ravnoteže između promjene oblika, troškova, složenosti izgradnje i težine. Performanse zrakoplova s morfirajućim krilom uvelike ovise o stupnju postizanja ovih ravnoteža.

### 4.1. AWIATOR projekt

Aircraft Wing with Advanced Technology Operation projekt je baziran na implementiranju novih zrakoplovnih tehnologija i uređaja u postojeće sustave krila zrakoplova. Osnovan od strane Europske Unije točnije Airbusa te uključuje razne inovativne tehnologije kao što su mini-zakrilca, reduktore vrtloga te detektore naleta vjetra što najavljuje dolazak lakših i „inteligentnijih i pametnih“ zrakoplova koji trenutno reagiraju na promjene u brzini vjetra i ostale nepredvidljive uvjete leta zrakoplova.

Dizajn novog zrakoplova mora zadovoljavati sve ove nove uvjete uz primjenu novih tehnologija, a postojeći zrakoplovi bi se morali nadograditi novim tehnološkim rješenjima. U sklopu AWIATOR projekta, primjena i integracija novih tehnologija uz demonstraciju na raznim probnim letovima.

Cilj AWIATOR projekta je integracija naprednih tehnologija u nove fiksne konfiguracije krila za postizanja napretka u poboljšanju učinkovitosti zrakoplova. Jedan od ciljeva programa je smanjivanje vrtloga koji zrakoplov ostavlja iza sebe, te tako smanjiti potreban razmak između zrakoplova za 1 NM. Ovaj projekt ima za cilj smanjiti buku zrakoplova uz korištenje novih uređaja, potom smanjiti potrošnju goriva za 2 posto i smanjiti težinu zrakoplova za 10 posto. Također, kao višegodišnji projekt, ocjenjuje nove tehnologije krila zrakoplova u svim letnim situacijama. [15]

Rezultati testiranja tehnologija i uređaja AWIATOR projekta su se pokazali uspješnima te su se postigli sigurniji, ugodniji i ekološki prihvatljivi letovi zrakoplova. Testiranja su se izvodila kroz par faza testiranja u zračnim tunelima i testiranja na zrakoplovu Airbus A340.

Rezultati najistaknutijih uređaja su:

1. Povećani *wingleti* su visine 3,73 metara su bili ugrađeni na A340-300 i testiranja su pokazala poboljšanja u strukturalnim i aerodinamičkim karakteristikama te njihovu sposobnost većeg smanjenja otpora od standardnih *wingleta* kao i smanjenje omjera potrošnje goriva.

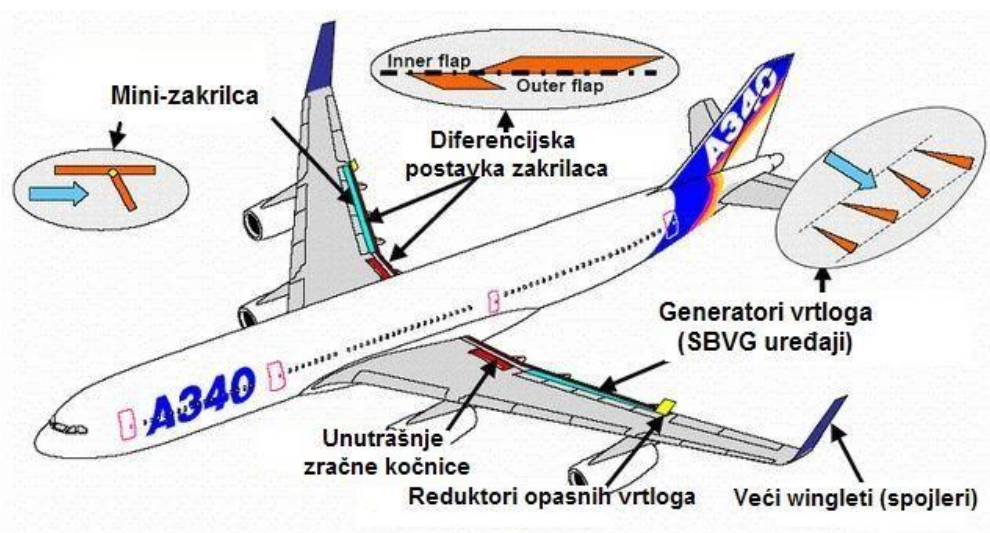
2. Modificirane zračne kočnice su dizajnirane s nekoliko otvora na donjem dijelu kočnice, tj. spojlera da bi poboljšale performanse istih. Otvori su preusmjeravali strujanje zraka prema krilu, što dalje od repa zrakoplova, te tako omogućili lakše upravljanje zrakoplova. Ta promjena je napravljena na novim, unutarnjim zračnim kočnicama koje pružju veći aerodinamički otpor i bolje poniranje zrakoplova.
3. Modificirana zakrilca su ugrađeni generatori vrtloga (SBVG<sup>7</sup>) i mini-zakrilca su poboljšala performanse pri malim brzinama zrakoplova zbog većih kutova otklanjanja zakrilca, do 35° od prijašnjih 31°, sa zanemarenim povećanjem otpora. Također, vidljiv je budući potencijal novih, jeftinijih, lakših i jednostavnijih sustava zakrilaca.
4. Sustav senzora turbulencija smješteni su na krilima i trupu zrakoplova šalju očitavanja na zaslon u kokpitu te tamo piloti procjenjuju intenzitet turbulencija i određuju žele li ih zaobići ili proći kroz njih. Ako se piloti odluče proći kroz njih, LIDAR<sup>8</sup> sustav senzora će nezavisno upravljati potrebnim zrakoplovnim površinama (mini-zakrilca) da bi let bio što ugodniji.

---

<sup>7</sup> SBVG (Sub Boundary-layer Vortex Generators) – uređaji za kontrolu graničnog sloja, odnosno oni odgađaju separaciju graničnog sloja, te se nalaze na gornjoj površini zakrilca.

<sup>8</sup> LIDAR (Light Detection and Ranging) – optička senzorska tehnologija mjerenja udaljenosti i ostalih osobina cilja osvjetljavajući cilj snopom svjetla, najčešće pulsevima lasera.

Demonstracije raznih testnih letova zrakoplova A340, čiji su novi dijelovi prethodno bili podvrgnuti raznim kompjuteriziranim testiranjima i simulacijama u zračnim tunelima te nekoliko zemaljskih testiranja, su bila pozitivno ocijenjena od strane stručnjaka te su vidljivi na slici 16. S obzirom da su se testiranja vodila na jednom modelu zrakoplova, preostaje još mnogo testiranja i procjenjivanja isplativosti određenih uređaja kao i njihova implementacija u ostale modele civilnih zrakoplova. Međutim, uređaji AWIATOR projekta se sve više koriste na postojećim zrakoplovima kao dodatno poboljšanje njihovih letnih karakteristika, te kao posljedica toga, projekt je omogućio stručnjacima i dizajnerima više slobode i inovacije pri konstruiranju zrakoplova. [16]



Slika 16. Osnovne tehnologije AWIATOR projekta

Izvor: Mirković, M.: *Nova tehnološka rješenja konstrukcije krila zrakoplova, završni rad*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2011.



## 4.2. AWW projekt

NASA je u suradnji s U.S. Air Force Research Laboratory (AFRL) i Boeing Phantom Works istraživao adaptaciju zrakoplova braće Wright. Zanimalo ih je upravljanje zrakoplovom braće Wright savijanjem krila. Projekt se temeljio na upravljanju zrakoplovom uvijanjem fleksibilnog krila na modificiranom McDonnell-Douglas F/A-18 Hornet, dobivenim od američke mornarice 1999. godine koji je prikazan na slici 17.



Slika 17. McDonnell-Douglas F/A-18 Hornet

Izvor: <http://www.reocities.com/CapeCanaveral/Hall/5777/hornet.html>, (30.07.2017.)

Aerodinamičke sile koje djeluju na zakrilca i krilca korištene su da se inače fiksno krilo može saviti te da se postigne lakše upravljanje ovim zrakoplovom. Umjesto korištenja krilca i zakrilca za kontroliranje leta zrakoplova, braća Wright su izabrali okretanje vrhova krila za lakše kontroliranje leta zrakoplova. Umjesto korištenja palica koji su imali na zrakoplovu, oni su osmislili sedlo u kojem je ležao pilot, a koje se spajalo s vrhovima krila. Pilot je pomicanjem svojih bokova lijevo ili desno pomicao i vrhove krila prema gore ili dolje te na taj način omogućavao sebi posebnu kontrolu nad zrakoplovom.

Istraživanje AWW projekta započelo je 1996. godine, sa završetkom 2005. godine. Za vrijeme trajanja projekta, zrakoplov s aktivnim aeroelastičnim krilom je bio podvrgnut opsežnim strukturnim opterećenjima, testovima krutosti krila, testovima vibracija i performansi zrakoplova. Stvorili su aktivno aeroelastično krilo, što je omogućilo više slobode za stvaranje učinkovitijih i tanjih krila za buduće zrakoplove, s mnogo boljim

performansama i smanjenom strukturnom težinom krila od 10 do 20 posto što će omogućiti povećanje učinkovitosti goriva. [17]

### 4.3. NASA X - 1

NASA je imala poslije Drugog svjetskog rata projekt X zrakoplova, od kojih je u zrakoplovu X-1 pilot probio zvučni zid, a zrakoplov X – 15 letio u svemir. NASA-in „New Aviation Horizons“ želi vratiti X zrakoplove uz korištenje novih tehnologija na njima. Ova vrsta zrakoplova trebala bi manje zagađivati okoliš, uz manju potrošnju goriva, uz kraće vrijeme potrošeno na operacije prihvata i otpreme. Zrakoplov X – 43 je vidljiv na slici 18.



Slika 18. NASA X – 43

Izvor: <https://www.nasa.gov/centers/dryden/history/pastprojects/HyperX/index.html>, (30.07.2017.)

Svrha ovog projekta je bila da se istraže kompozitni materijali, potom konstrukcija zakrilca koja mijenjaju oblik i pokušaj dugoročnog smanjivanja troškova za cijelu zrakoplovnu industriju. Ova vrsta zrakoplova treba biti povoljnija za supersonični let, uz korištenje baterije za pokretanje propelera i pokretna krila. Ovakvi zrakoplovi trebaju moći letjeti manjim brzinama. Neki od dizajna uključuju i dvostruko široki trup. [18]

## 4.4. HECS

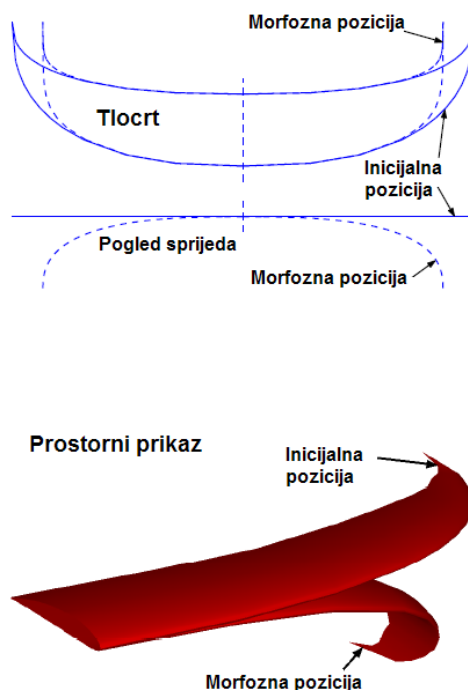
HECS<sup>9</sup> program je dio projekta morfoze krila zrakoplova agencije NASA koji analiziraju bio-mimetiku ptica i osnovnih karakteristika ponašanja krila u letu i zatim to implementiraju na dizajniranje krila zrakoplova. Projekt uključuje analiziranje svih aeroelastičnih efekata na krila, dinamičkog jedrenja krila i skupnu kontrolu krila. Rješenje do kojeg su došli stručnjaci iz NASA-e zove se krilo s hiper-eliptičnim savijajućim rasponom, HECS krilo.

Programu su prethodila višegodišnja proučavanja promjene krila ptica u letu, potom drugih programa morfoze krila. Napretkom tehnologije, izumom novih materijala, postavio se cilj konstruiranja boljeg i modernog krila zrakoplova sa što boljim i multifunkcionalnim performansama u odnosu na konvencionalna krila. Fokus programa je bio na konstrukciji učinkovitog krila uz integriranje najvažnijih karakteristika krila ptica u letu i napredne zrakoplovne tehnologije i konstrukcije.

U istraživačkom centru NASA-e se proučava nova konfiguracija krila s hiper-eliptičnim savijajućim rasponom, koja može dovesti do povećanja stabilnosti i kontrole leta zrakoplova, smanjenja induciranog otpora te poboljšanja aerodinamičke učinkovitosti tijekom leta zrakoplova. Dizajn HECS krila prikazan je na slici 19., gdje se vide sastavnice od dvije konfiguracije oblika krila, prvobitna konfiguracija ravnog “konvencionalnog” oblika krila te transformiranog, savijenog oblika krila. Prvobitan ili inicijalan oblik krila izgleda kao normalno fiksno krilo koje se proteže od trupa zrakoplova lagano prema unazad, dok u morfoznom, krajnjem obliku, krilo ima hiper-eliptičan oblik napadne i izlazne ivice pomaknut unazad. [19]

---

<sup>9</sup> HECS (Hyper-Elliptic Cambered Span) – krilo sa hiper-eliptičnim savijajućim rasponom.



Slika 19. Prikaz konfiguracije HECS krila

Izvor: Stubbs, M. D.: *Kinematic Design and Analysis of a Morphing Wing* Matthew, Virginia, 2003.

Kontrola uzdužnog i poprečnog nagiba kao i kontrola smjera se vrši morfozom cijelog krila, posebno vrha krila. Ovo se postiže uz posebne strukturne nosače i materijale koji su raspoređeni duž krila, a izrađeni su od pojedinačnih stanica koji su međusobno ovisne i sadrže tetive od kablova koji ih pokreću. Taj strukturni spoj služi kao pokretni, klizni zglobov za morfozu krila. Stanice unutar strukturnog nosača su spojene preko usuglašanih zglobova i na taj način međusobno prenose momente savijanja krila. Strukturni materijal koji se nalazi oko tih nosača je legura memorije oblika SMA<sup>10</sup>, što omogućava da se pri mijenjanju i otpuštanju kablova koji pokreću cijelu strukturu nosača krila, krila vraćaju svoj oblik u svoj prvobitni položaj ili vrše promjenu oblika krila pod djelovanjem postojećih aerodinamičkih sila. [20]

Više je prednosti ovih nosača. Prva je da je struktura lagana, potom da je omogućena glatka i precizna promjena oblika krila, omogućeno je postavljanje oplata duž krila, a sami kablovi imaju veliku sposobnost aktiviranja. Kod HECS krila, raspored strukturnih čelijskih nosača je vrlo važan, jer je primarni oblik deformacije savijanje krila po razmahu s većim savijanjem pri vrhu krila. Ovisno gdje se nalazi nosač, na gornjoj ili donjoj površini, postavljaju se kablovi i čvorišta koji mu omogućuju gibanje morfoze krila.

Dizajn oplata HECS krila također mora biti kvalitetan tako da omogućuje morfozu krila dok se prenose razna aerodinamička opterećenja tijekom leta. Oplata HECS krila treba imati odlike

---

<sup>10</sup> SMA (Shape Memory Alloy) – Legura memorije oblika

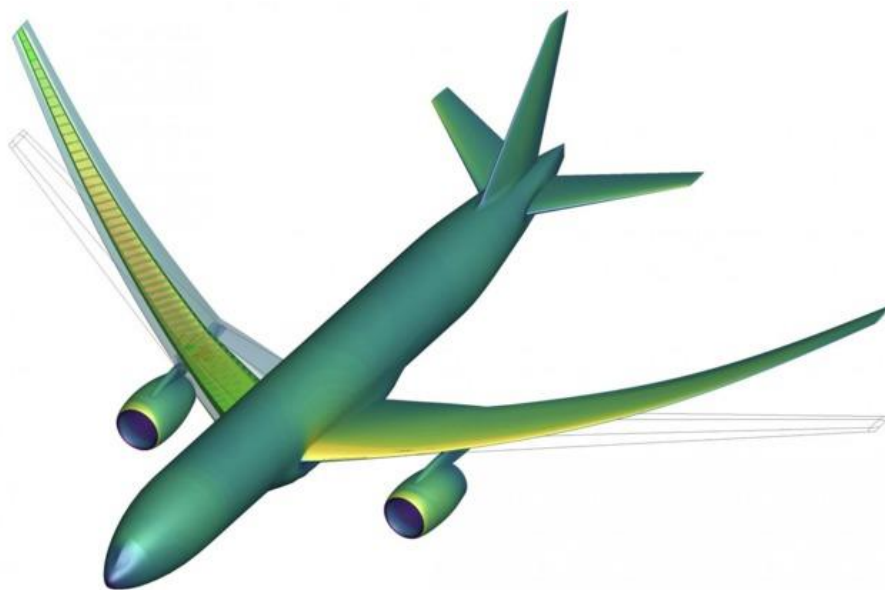
niske membranske krutosti što omogućuje lakšu morfozu i smanjenje sile aktivacije morfoze. Također treba posjedovati karakteristike visoke krutosti sa vanjske strane da može prenositi aerodinamička opterećenja i zadržavati svoj aerodinamički oblik. Sve ove uvjete zadovoljavaju viskoko-naprezajući materijali kao što su superelastični SMA materijali, kompozitni elastomera jakih snaga te neprobojno-napete strukture.

Dizajn oplata i materijala može biti od više slojeva, od savijene unutarnje oplata koja se nalazi ispod elastične oplata krila i od segmentirane oplata koja klizi jedna o drugu tijekom deformacije krila. Najprikladnija HECS krilu je segmentirajuća iz razloga jer najbolje zadovoljava tražene uvjete i lako se nadovezuje na čvorišta ćelija strukturnih nosača.

Testiranja HECS morfoze krila su vršena u zračnim tunelima na malim brzinama od 65 km/h do 80 km/h da bi se održao planarni oblik krila. Problem koji se pokazao za vrijeme testiranja je bio deformiranje vrha krila, što je tražilo dodatnu ugradnju 50 posto više kablova, da bi vrh krila izdržao aerodinamičke sile i opterećenja tijekom leta. Drugi problem koji se pojavio bio je taj da su se kutovi transformacije krila smanjili za 5-10 posto da bi se očuvao životni vijek SMA žica i materijala.

Rezultati testiranja su pokazali da se mogu uspješno kontrolirati sve aerodinamičke sile i kretanja pomoću vrha HECS krila, mada je upitno koliko je HECS program morfoze krila dobar i isplativ program zbog raznih činitelja i odnosa same težine krila i količine opterećenja krila. Testiranja HECS krila na bespilotnim letjelicama još traju, što daje mogućnost novih iznalaženja tehnoloških rješenja za brze i glatke promjene krila.

Budućnost ovog projekta i daljnja istraživanja se odnose na nove i lakše aktuatore uz povećanje broja aktuatora na krajevima krila što se može vidjeti na slici 20. što bi dovelo do smanjenja težine i poboljšanja snage momenta kontrole oblika krila i same morfoze krila. Polimeri memorije oblika smanjuju potrošnju snage pri zagrijavanju materijala kod promjene oblika. [19]



Slika 20. HECS zrakoplov

Izvor: <http://www.ien.com/product-development/news/20854183/aircraft-of-the-future-has-morphing-wings>, (30.07.2017.)

## 5. ZAKLJUČAK

Projekt razvoja morfoze krila zrakoplova se odvija dugi niz godina, uz postepeno iskorištavanje i uvođenje novih tehnoloških rješenja za materijale i tehnologije s namjerom za poboljšanje performansi krila tijekom leta. Koncepti poput HECS krila i aktivnog aeroelastičnog krila su uspješno završeni uz optimalne rezultate tijekom testiranja te je otvorilo vrata pomicanju novih granica u dizajnu krila zrakoplova. Kreiraju se nove konstrukcijske mogućnosti poput smanjenja horizontalnog repa kod AAW projekta ili promjene oblika aeroprofila. Konvencionalni projekti poput AWIATOR projekta, čiji se određeni uređaji već koriste na zrakoplovima, uspješno se prilagođavaju današnjim zahtjevima na tržištu s bržim, ekonomičnijim i raznovrsnijim letovima. Uređaji AWIATOR projekta su se pokazali efektivnima u poboljšanju određenih performansi zrakoplova, kao što su bolja stabilnost pri slijetanju i manjim brzinama zrakoplova, smanjenju turbulencija. Ipak postoji potreba za novim, nekonvencionalnim dizajnom zrakoplova i krila za poboljšanje upravljivosti i iskoristivosti zrakoplova.

Prema aerodinamičkim načelima, morfoza krila predstavlja težnju prema idealnom obliku u točno određenoj fazi leta. U ovisnosti s nekom fazom leta određuje se napadni kut krila. Napredovanje tehnologije i potreba za novim tehnološkim rješenjima krila i zrakoplova traži nove koncepte u konstrukciji krila, gdje je glavna morfoza krila zrakoplova. Težnja se usmjerava prema idealnom zrakoplovu koji u letu ima mogućnost prilagodbe brzine prema trenutačnom zadatku odnosno uvjetima leta. Upravo to što potiče stručnjake na istraživanje novih zrakoplovnih tehnologija i materijala.

Dizajneri koncepata moraju prilikom razvoja voditi računa o činjenici da zrakoplov nije sustav, nego samo jedan dio sustava s centralnom namjenom. Kada se vodi pretjerana briga oko kompleksnosti zrakoplova ili o troškovima, dovodi se do pitanja koliko je koncept neproduktivan bez obzira na sustavnu učinkovitost ili neučinkovitost.

Predviđanja su da će nove generacije programa morfoze krila, DARPA, MAS program ili HECS program, promijeniti i poboljšati postojeće programe uz napredovanje tehnologija i tehnoloških spoznaja. Pritom se misli na tehnologije kao što su umjetna inteligencija, nanotehnologija i bio-mimetrika, te raznih tehnoloških materijala uz korištenje senzora i samoaktivacijskih sposobnosti.

Prednosti morfoze krila se baziraju na manjoj potrošnji goriva, boljoj iskoristivosti zrakoplova, smanjenju buke što je izrazito važno u današnjem zrakoplovstvu zbog kvalitete i zadovoljstva putnika.

# LITERATURA

1. Brozović, D., Kovačec, A., Ravlić, S.: *Hrvatska enciklopedija 11 Tr-Ž, Leksikografski zavod Miroslav Krleža*, Zagreb, 2009.
2. Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: *Zrakoplovna prijevozna sredstva I*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008.
3. [https://www.fsb.unizg.hr/miv/nastava/zrakoplovstvo/Jedrilice\\_i\\_zmajevi/seminari/09\\_medic\\_srdjan\\_konstrukcija\\_jedrilice.htm](https://www.fsb.unizg.hr/miv/nastava/zrakoplovstvo/Jedrilice_i_zmajevi/seminari/09_medic_srdjan_konstrukcija_jedrilice.htm), (15.06.2017.)
4. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/forces.html>, (15.06.2017.)
5. <https://aviation.stackexchange.com/questions/13876/what-is-a-vortex-generator>, (17.06.2017.)
6. Barbarino, S., Bilgen, O., Ajaj, R. M., Friswell, M. I., Inman, D. J.: *A Review of Morphing Aircraft, Journal of intelligent material systems and structures*, Vol. 22, USA, 2011.
7. Skillen, M. D., Crossley, W. A.: *Morphing Wing Weight Predictors and Their Application in a Template-Based Morphing Aircraft Sizing Environment II, Part II: Morphing Aircraft Sizing Via MultiLevel Optimization*, School of Aeronautics and Astronautics, Indiana, 2008.
8. Joshi, S. P., Tidwell, Z., Crossley, W. A., Ramakrishnan S.: *Comparison of Morphing Wing Strategies Based Upon Aircraft Performance Impacts*, California, 2004.
9. McGowan, A-M. R., Washburn, A. E., Horta, L. G., Bryant, R. G., Cox, D. C., Siochi, E. J., Padula, S. L., Holloway, N. M.: *Recent Results from NASA's Morphing Project*, NASA Langley Research Center, USA, 2008.
10. Neal, D. A.: *Design, Development, and Analysis of a Morphing Aircraft Model for Wind Tunnel Experimentation*, Virginia, 2006.
11. <https://alchetron.com/Westland-Hill-Pterodactyl-4969169-W>, (15.07.2017.)
12. Weisscharr, T. A.: *Morphing Aircraft Technology – New Shapes for Aircraft Design*, USA.
13. <http://www.ctrl-c.liu.se/MISC/RAM/rk.html>, (02.07.2017.)
14. [http://dnc.tamu.edu/projects/flowcontrol/Morphing/public\\_html/darpa.html](http://dnc.tamu.edu/projects/flowcontrol/Morphing/public_html/darpa.html) (03.07.2017.)
15. Richter, K., Rosemann, H.: *Numerical investigation on the Aerodynamic effect of mini – tends on the AWIATOR aircraft at cruise conditions*, Germany.
16. Mirković, M.: *Nova tehnološka rješenja konstrukcije krila zrakoplova, završni rad*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2011.



17. <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-061-DFRC.html>  
(30.07.2017.)
18. [http://newatlas.com/nasa-x-planes-return/41937/?li\\_source=LI&li\\_medium=default-widget](http://newatlas.com/nasa-x-planes-return/41937/?li_source=LI&li_medium=default-widget), (30.07.2017.)
19. Stubbs, M. D.: *Kinematic Design and Analysis of a Morphing Wing* Matthew, Virginia, 2003.
20. <http://www.ien.com/product-development/news/20854183/aircraft-of-the-future-has-morphing-wings>, (30.07.2017.)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Elementi konstrukcije krila .....	5
Slika 2. Djelovanje 4 sile na zrakoplov .....	6
Slika 3. Povećanje sile uzgona .....	7
Slika 4. Protok zraka prije i nakon postavljanja vortex generatora.....	10
Slika 5. Orao u letu.....	12
Slika 6. Grafički prikaz cilja projekta morfoze .....	14
Slika 7. Promjena oblika krila .....	15
Slika 8. N-MAS konfiguracija s tri različite promjene položaja krila za vrijeme različitih režima leta .....	16
Slika 9. Konfiguracija Lockheed Martinova krila.....	17
Slika 10. Pterodactyl IV.....	18
Slika 11. Koncepti morfoze krila zrakoplova MAS programa: lijevo - Lockheed – Martin, desno - NextGen Aeronautics .....	20
Slika 12. Batwing " krilo šišmiša" - NextGen Aeronautics koncept morfoze krila .....	21
Slika 13. Promjenjivi oblici krila kod P2-APVE, N-MAS i P1-APVE .....	22
Slika 14. Zrakoplov RK.....	23
Slika 15. Napuhavanje krila .....	24
Slika 16. Osnovne tehnologije AWIATOR projekta.....	27
Slika 17. McDonnell-Douglas F/A-18 Hornet .....	28
Slika 18. NASA X – 43 .....	29
Slika 19. Prikaz konfiguracije HECS krila.....	32
Slika 20. HECS zrakoplov.....	32



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad

isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenju literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ završnog rada  
pod naslovom **Morfoza krila zrakoplova**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 1.9.2017 \_\_\_\_\_

*M. Gbić*

(potpis)